

**Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky**

**Vliv tepelného namáhání na útlum optických vlnovodů z
polydimethylsiloxanu**

**Influence of the thermal load on attenuation of optical
waveguides made from the polydimethylsiloxane**

2019

Michal Hřiva

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Hříva

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv tepelného namáhání na útlum optických vlnovodů z
polydimethylsiloxanu.
Influence of the thermal load on attenuation of optical waveguides made
from the polydimethylsiloxane.

Jazyk vypracování:

čeština

Zásady pro vypracování:

Polymer polydimethylsiloxan (PDMS) se vyznačuje vlastnostmi, které lze velmi dobře aplikovat v rámci vláknové optiky pro přenos světla na krátké vzdálenosti. Pro jeho bližší využití je ale nezbytné analyzovat různé vlivy, které mohou ovlivnit útlumové parametry. Tato bakalářská práce se bude věnovat analýze dlouhodobého teplotního namáhání vlnovodů z PDMS a jeho vliv na útlumové parametry pro různé vlnové délky světla.

Zadání práce:

1. Popište optické parametry polymeru polydimethylsiloxan (PDMS) a jeho možné využití pro optické účely.
2. Realizujte laboratorní vzorky vlnovodů z různých druhů polydimethylsiloxanu o min. délce 10 cm a změřte jejich útlumové parametry.
3. Proveďte dlouhodobé časové zatížení jednotlivých vzorků teplotou kolem 100°C.
4. Vyhodnoťte a statisticky zpracujte útlumové parametry jednotlivých vzorků pro různé vlnové délky světla.

Seznam doporučené odborné literatury:

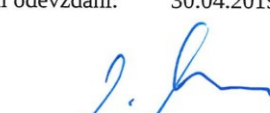
- [1] Fendinger, N. J., "Polydimethylsiloxane (PDMS): Environmental Fate and Effects," Organosilicon Chemistry Set," (2005).

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Nedoma, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2018

Datum odevzdání: 30.04.2019


prof. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

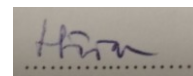



prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *25. dubna 2019*

A rectangular box containing a handwritten signature in dark ink. The signature is stylized and appears to be 'Hana'. Below the signature, there is a horizontal line of small dots.

podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval Ing. Janu Nedomovi, Ph.D. za odbornou pomoc a konzultace při vytváření této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval Mgr. Janu Jargusovi za jeho zkušenosti v oblasti PDMS a spolupráci v laboratoři.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je analýza vlivu tepelného namáhání na útlum optických vlnovodů vytvořených z polymeru polydimethylsiloxan (PDMS).

Úvod práce se věnuje teoretickému popisu šíření světla v optických vláknech a optickým parametrům PDMS, které jsou velmi podobné klasickým křemičitým vláknům. V praktické části je popsána experimentální výroba optických vlnovodů, návrh měřicího schéma pro měření útlumových parametrů vlnovodů po dlouhodobém teplotním namáhání při teplotě kolem 100°C a to pro různé vlnové délky. Získané data byly statisticky a graficky vyhodnoceny v závislosti na použitých vlnových délkách zdroje záření.

Klíčová slova

PDMS, útlum, vlnová délka, odraz světla, vlnovod, tepelné zatěžování

Abstract

The goal of this thesis is to analyze the influence of the thermal load on attenuation of optical waveguides made from the polymer polydimethylsiloxane (PDMS).

The beginning of this thesis is dedicated to describing how the light works in optical fibers and optical parameters of PDMS, which are very similar to silicon fibres. In practical part is described experimental production of optical waveguides, design of measuring scheme for measure attenuation of optical waveguides after long term thermal load with 100°C for different wavelengths. The data were statistically and graphically evaluated on dependencies for each used wavelengths.

Key words

PDMS, attenuation, wavelength, light reflection, waveguide, thermal load

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	Význam symbolu
U	V	Napětí
I	A	Proud
A	dB	Útlum
C	m/s	Rychlost světla ve vakuu
λ	nm	Vlnová délka
f	Hz	Frekvence
n	[-]	Index lomu
α_{\square}	°	Kritický úhel
E	$V \cdot m^{-1}$	Elektrické pole
P	W	Výkon
P _{in}	W	Vstupní výkon
P _{out}	W	Výstupní výkon

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
PDSM	Polydimethylsiloxane
LED	Light Emitting Diode
PVC	Polyvinylchlorid
NA	Numerická apertura
TIR	Total internal reflection

Obsah

Úvod.....	- 11 -
1 Světlo.....	- 12 -
1.1 Index lomu.....	- 12 -
1.2 Snellův zákon a odraz lomu	- 13 -
1.3 Úplný odraz	- 14 -
2 Optické vlákna.....	- 15 -
2.1 Numerická apertura	- 15 -
2.2 Typy optických vláken	- 16 -
2.2.1 Jednovidová optická vlákna	- 16 -
2.2.2 Mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu.....	- 17 -
2.2.3 Gradientní optická vlákna s plynou změnou indexu lomu.....	- 17 -
2.3 Útlum v optických vláknech.....	- 18 -
2.3.1 Makroohyb	- 18 -
2.3.2 Mikroohyb	- 19 -
2.3.3 Mieův rozptyl	- 19 -
2.3.4 Rayleighův rozptyl	- 19 -
2.3.5 Absorbce.....	- 20 -
3 Polydimethylsiloxan (PDMS)	- 21 -
3.1 Chemické složení	- 21 -
3.2 Sylgard	- 21 -
3.2.1 Sylgard 184.....	- 21 -
4 Výroba vlnovodů.....	- 23 -
4.1 Příprava směsi	- 23 -
4.2 Naplňování vzorků	- 24 -
4.3 Finální úprava světlovodů	- 25 -
5 Měřicí pracoviště.....	- 27 -
5.1 Použité přístroje.....	- 27 -
5.1.1 Rohde & Schwarz HM8143	- 27 -
5.1.2 LED diody	- 27 -

5.1.3	Měřicí soustava.....	- 27 -
6	Měření	- 30 -
6.1	Metodika měření	- 30 -
6.2	Vypočtené hodnoty útlumu pro jednotlivé vlnovody	- 30 -
6.3	Grafické zpracování výsledků	- 33 -
6.3.1	635nm (červená LED)	- 34 -
6.3.2	590nm (oranžová LED).....	- 34 -
6.3.3	525nm (zelená LED)	- 35 -
6.3.4	465nm (modrá LED)	- 36 -
6.3.5	Celkové porovnání všech vlnových délek.....	- 36 -
7	Závěr	- 38 -
	Použitá literatura	- 39 -
	Seznam příloh.....	- 41 -

Úvod

Cílem této bakalářské práce je dlouhodobé tepelné zatěžování optických vlnovodů z polydimethylsiloxanu (PDMS) a sledování útlumových parametrů jednotlivých vzorků. PDMS je charakterizován zajímavými vlastnostmi, zejména teplotní stabilitou. V dnešní době je tohle téma velmi populární, a to především pro oblast automobilového průmyslu.

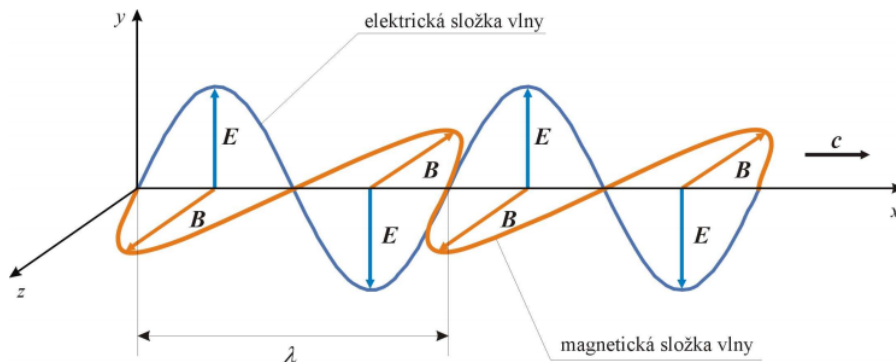
Tato práce je rozdělena na dvě základní části, a to na teoretický popis šíření světla v optických vláknech a na samotný polymer PDMS, který se vyznačuje optickými parametry velmi blízkými konvenčním křemičitým vláknům.

Praktická část práce je zaměřena na experimentální vytvoření vlnovodů z PDMS o minimální délce 10 cm. Popsán je způsob manipulace s PDMS, příprava a samotný proces zahrnující jednotlivé kroky k vytvoření vzorků vhodných pro experimentální měření. Práce dále obsahuje návrh a popis jednotlivých komponentů měřicího schéma pro analýzu útlumových parametrů stejně tak metodiku měření, která je založena na dlouhodobém teplotním zatěžování vytvořených vzorků v teplotním boxu o teplotě kolem 100°C. Navazujícím krokem je proces statistického zpracování dat a vytvoření grafických výstupů, které popisují získané výsledky.

Naměřené výsledky (získané zdrojem záření ve formě modré LED) mohou být využity pro oblast osvětlování a to konkrétně zdroje záření ve formě modré LED a vlnovodu z PDMS, kdy je na konci vlnovodu nanášena tenká vrstva luminoforu pro generování bílého světla na výstupu.

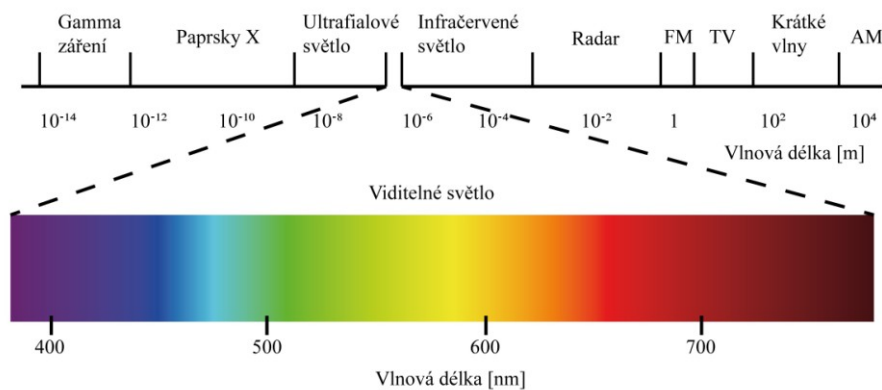
1 Světlo

Světlo je elektromagnetické vlnění, které se dokáže šířit ve vakuu (nepotřebuje ke svému šíření žádné látkové prostředí). Elektrické pole E a magnetické pole B jsou vždy kolmé ke směru šíření vlny. Vektorový součin $E \times B$ udává směr šíření vlny. Pokud se jedná o harmonickou vlnu, pak elektrická intenzita E a magnetická indukce B jsou ve fázi a mají stejnou frekvenci.



Obrázek 1.1: Znáznornění elektrické a magnetické složky vlny [3]

Viditelné světlo má rozsah vlnových délek ve vakuu 380nm - 790nm. V závislosti na vlnové délce lidské oko vnímá různé barvy světla. Světlo, které nepatří do viditelného spektra označujeme jako elektromagnetické záření. Na obrázku 1.2 je znázorněno elektromagnetické spektrum[1].



Obrázek 1.2: Elektromagnetické spektrum [2]

1.1 Index lomu

Světlo se ve vakuu šíří rychlostí $c = 299792458$ m/s, v ostatních prostředích se světlo šíří rychlostí v . Rychlost v je vždy menší než rychlost ve vakuu. Indexem lomu nazýváme poměr těchto rychlostí.

$$n = \frac{c}{v} \quad (1.1)$$

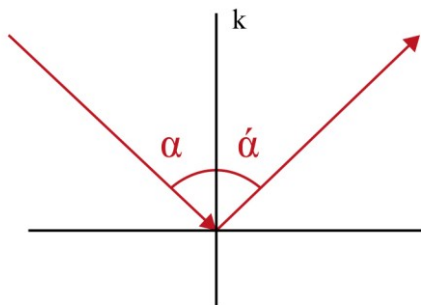
Platí, že $n \geq 1$. Pokud srovnáváme 2 různá prostředí, tak prostředí kde se světlo šíří rychleji, říkáme, že toto prostředí se nazývá opticky řidším. Pokud se světlo šíří pomaleji v prostředí, tak nazýváme prostředí opticky hustším.

1.2 Snellův zákon a odraz lomu

Jestliže paprsek dopadá na rozhraní dvou optických prostředí, pak se paprsek odrazí. Tento jev nazýváme odraz světla. Odraz světla závisí na indexech lomu optických prostředí, úhlu dopadu paprsku a polarizaci světla.

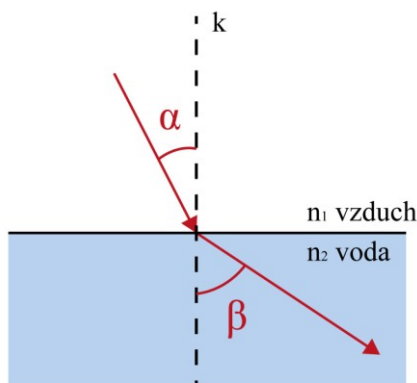
Zákon odrazu světla říká, že velikost úhlu odrazu je rovna velikosti úhlu dopadu. Jinými slovy lze říci, že dopadající paprsek α bude mít stejný úhel jako odražený paprsek α' .

$$\text{Matematicky to lze vyjádřit} \quad \alpha = \alpha' \quad (1.2)$$



Obrázek 1.3: Odraz světla [4]

Ze Snellova zákonu plyne, že při průchodu světla z hustšího prostředí do opticky řidšího prostředí dochází k lomu světla směrem od kolmice vzhledem k rozhraní prostředí, a naopak při průchodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího dochází k lomu světla směrem ke kolmici vzhledem k rozhraní prostředí.



Obrázek 1.4: Lom světla

Matematicky můžeme snellův zákon definovat následovně:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} = n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (1.3)$$

1.3 Úplný odraz

Jestliže se bude zvyšovat úhel z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího, tak se bude zvyšovat i úhel lomu. Na obrázku 1.5 můžeme vidět červený paprsek č. 2, který má úhel lomu $\frac{\pi}{2}$ (90°). Tento úhel nazýváme kritickým (mezním) úhlem a značí se α_c . Pokud dále budeme zvětšovat dopadový úhel, pak dochází k úplnému odrazu světla. Ze snellova zákona lze definovat následující:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta \quad (1.3)$$

Jako úhel β použijeme $\frac{\pi}{2}$

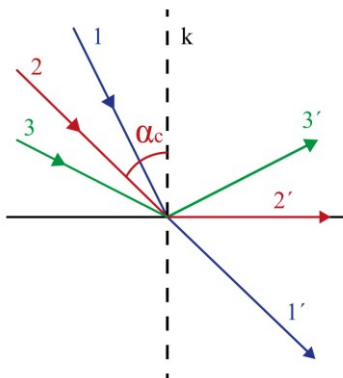
$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \sin \left(\frac{\pi}{2} \right) \quad (1.4)$$

$$\sin \left(\frac{\pi}{2} \right) = 1$$

$$n_1 \sin \alpha_c = n_2 \quad (1.5)$$

$$\sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1} \quad (1.6)$$

Úplný odraz světla se využívá pro přenos světla optickými vlákny.

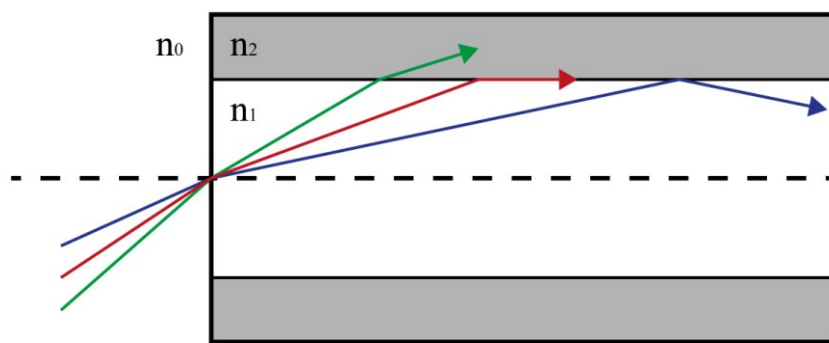


Obrázek 1.5: Úplný odraz světla

2 Optická vlákna

Optická vlákna jsou ve tvaru válce, jsou buď vyráběny z křemenného skla (SiO_2) nebo plastu. Optická vlákna vyráběná ze skla jsou dražší, ale mají lepší vlastnosti. Používají se pro přenos dat na velké vzdálenosti s vysokými přenosovými rychlostmi. Plastová vlákna se používají například v lokálních sítích.

Světlo v optických vláknech se šíří pomocí úplného vnitřního odrazu (TIR - Total internal reflection). Pro úplný vnitřní odraz musí platit $n_1 > n_2$ (index lomu jádra > index lomu pláště). Jako další podmínkou pro TIR světlo musí dopadat pod větším úhlem než je kritický úhel α_c . Index lomu okolního prostředí je n_0 [5].



Obrázek 2.1: Úplný vnitřní odraz [5]

Na obrázku 2.1 lze vidět, že červený paprsek svírá kritický úhel. Pokud nějaký paprsek svírá menší úhel než právě ten kritický, tak dojde k průchodu do světla do pláště a přicházíme o výkon (zelený paprsek). Modrý paprsek svírá větší úhel jak kritický a $n_1 > n_2$, tak dochází k totálnímu odrazu světla zpět do jádra.

2.1 Numerická apertura

Numerická apertura je jednou ze základních charakteristik optického vlákna. Je to maximální úhel, pod jakým paprsky mohou dopadat tak, aby se mohli šířit v optickém vlákne. Výrobci optického vlákna udávají hodnotu numerické apertury v katalogu.

Ze snellova zákona známe

$$\sin \alpha_c = \frac{n_2}{n_1}$$

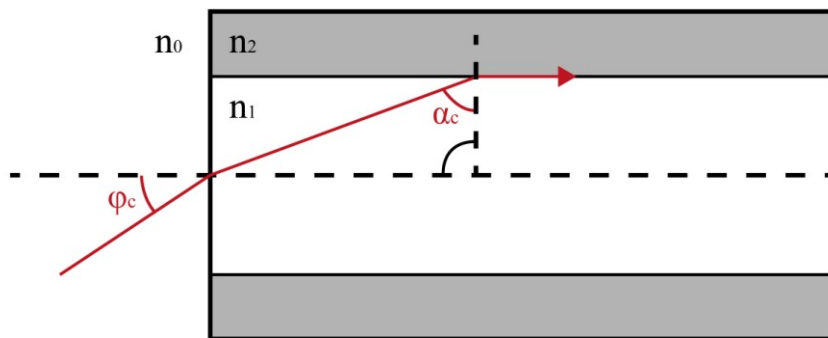
dále známe z geometrie

$$\sin^2(\alpha_c) + \cos^2(\alpha_c) = 1 \quad (2.1)$$

Dosažením $\sin \alpha_c$

$$\sin(\varphi_c) = \frac{1}{n_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \frac{1}{n_0} \text{NA} \quad (2.2)$$

$$\text{NA} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (2.3)$$



Obrázek 2.2: Kritický úhel v optickém vlákně [5]

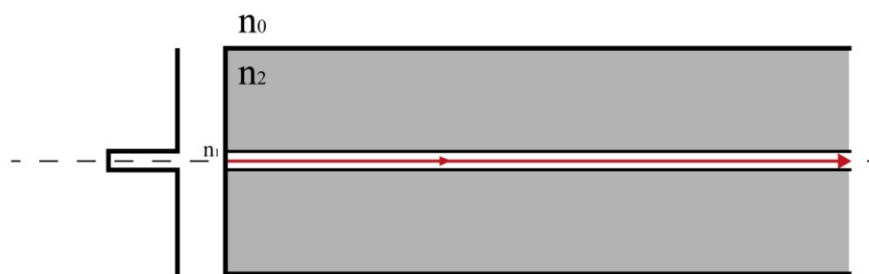
2.2 Typy optických vláken

Optická vlákna rozdělujeme do tří základních skupin. Na typu optického vlákna závisí index lomu jádra, index lomu pláště a průměr jádra. Optická vlákna rozdělujeme na jednovidová, mnohovidová se skokovou změnou indexu lomu a gradientní vlákna s pozvolnou změnou indexu lomu.

2.2.1 Jednovidová optická vlákna

Jednovidová optická vlákna se používají pro přenos dat na velké vzdálenosti (města, státy, kontinenty). U jednovidových vláken lze dosáhnout nejvyšších přenosových rychlostí, ze všech typů optických vláken. U jednovidových vláken nedochází k vidové disperzi, protože se přenáší pouze jeden paprsek (vid).

Abychom dosáhli jednovidového přenosu světla, musíme buďto zmenšovat průměr jádra optického vlákna nebo zmenšováním optických vlastností optického vlákna, tam kde dochází k odrazům světla, tedy na rozhraní dvou prostředí. Spíše se používá varianta zmenšování průměru jádra [5][7].

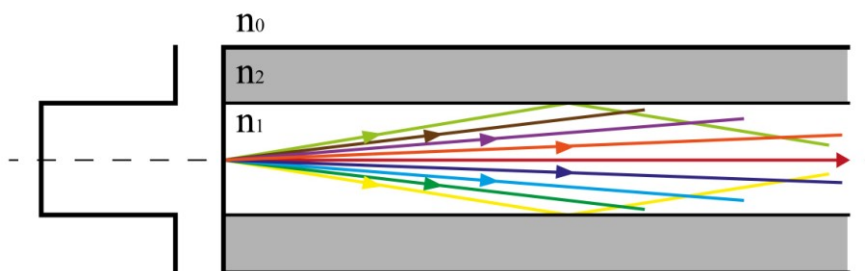


Obrázek 2.3: Jednovidové vlákno (Single mode)

2.2.2 Mnohovidová optická vlákna se skokovou změnou indexu lomu

Mnohovidovým optickým vláknem se mohou šířit 2 a více vidů najednou po různých dráhách. Každý paprsek má svou dráhu. Díky tomuhle jevu paprsky nedorazí na konec ve stejný časový okamžik. Nastává vidová disperze, výsledným efektem je zkreslení přijímaného signálu. Mnohovidová vlákna nejsou určena na velké vzdálenosti, ale jen na kratší vzdálenosti.

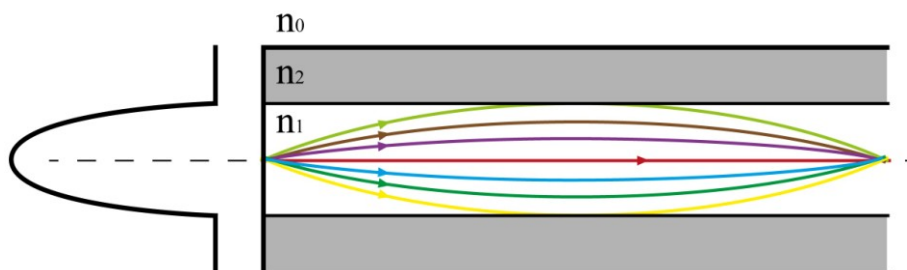
U mnohovidových vláken se skokovou změnou indexu lomu dochází k ostrému lomu paprsku. Aby se paprsky mohly takhle odrážet, musí být index lomu n_1 a n_2 konstantní [5][7].



Obrázek 2.4: Mnohovidové vlákno se skokovou změnou indexu lomu (Multi mode)

2.2.3 Gradientní optická vlákna s plynulou změnou indexu lomu

Pro tento typ vláken se index lomu mění se vzdáleností od středu vlákna. Paprsek se šíří v sinusovém směru a tento jev snižuje vidovou disperzi, jelikož paprsky dorazí na konec vlákna přibližně za stejný časový úsek [5][7].



Obrázek 2.5: Gradientní vlákno s plynulou změnou indexu lomu

2.3 Útlum v optických vláknech

Útlum nám určuje snížení výkonu optického signálu. Útlum značíme A [dB]. Útlum je logaritmický podíl vstupního výkonu P_{in} a výstupního výkonu P_{out} .

$$A = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) \quad (2.4)$$

Dále se setkáváme s pojmem měrný útlum a [dB/km], je to útlum, který je vztažen k určité délce vlákna l

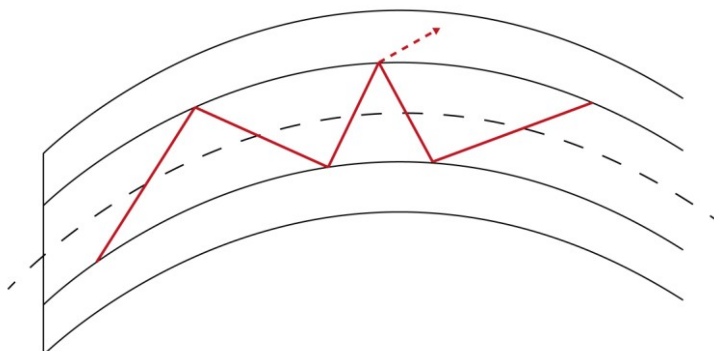
$$a = \frac{A}{l} = \frac{10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right)}{l} \quad (2.5)$$

Jelikož útlum je snížení výkonu signálu požadujeme, aby byl co nejmenší.

Útlum může být způsoben makroohybem, mikroohybem, rozptylem (Mieovým, Rayleighovým) nebo absorbcí (ultrafialovou, infračervenou, na OH iontech) [5][6][8][9].

2.3.1 Makroohyb

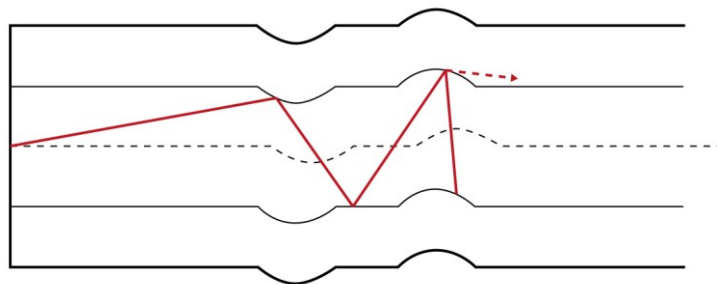
Při ohybu optického vlákna vznikají ohybové ztráty, kde dochází ke změně úhlu a porušuje se podmínka totálního odrazu světla. Makroohyby jsou způsobeny ohybem, kde část energie je vyzářena z jádra respektivě i pláště optického vlákna. Velikost útlumu v makroohybu je závislý na použité vlnové délce. Pokud je vlnová délka vyšší, tak je i útlum vyšší[5][6][8][9].



Obrázek 2.6: Makroohyb

2.3.2 Mikroohyb

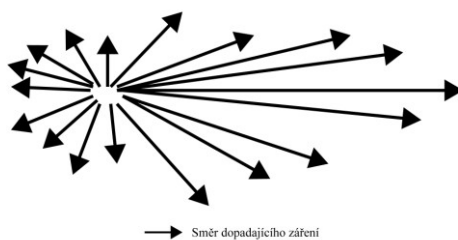
Mikroohyb je malá chyba v geometrii vlákna, to znamená, že vlákno není přímočaré. Mikroohyby vznikají při výrobě vlákna nebo působením okolních elementů [5][6][8][9].



Obrázek 2.7: Mikroohyb

2.3.3 Mieův rozptyl

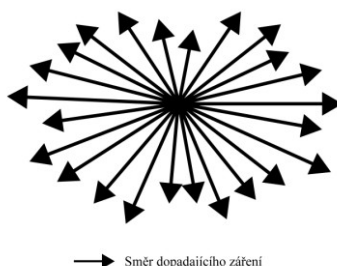
Vzniká na nehomogenitách srovnatelných s vlnovou délkou. Mieův rozptyl vzniká kvůli mikroskopickým bublinkám ve vlákne, kolísání průměru jádra, nedokonalou cylindrickou strukturou vlnovodu a nečistotami ve vlákne [5][6][8][9].



Obrázek 2.8: Mieův rozptyl

2.3.4 Rayleighův rozptyl

Rayleighův rozptyl vzniká tepelnými kmity krystalické mřížky. Rayleighův rozptyl není možné odstranit, ale lze jej částečně zmírnit, tím že se posune pracovní frekvence do infračervené oblasti[5][6][8][9].



Obrázek 2.9: Rayleighův rozptyl

2.3.5 Absorbce

Absorbce se rozděluje na dvě skupiny. Na vlastní absorpci a na nevlastní absorpci.

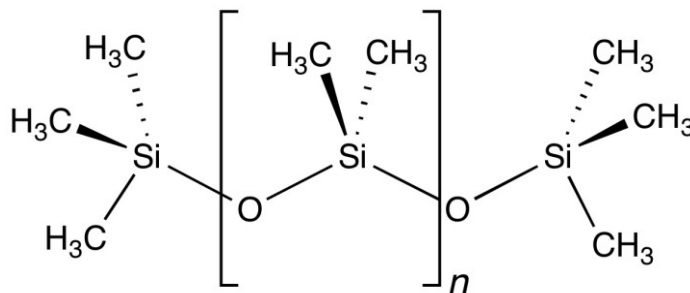
Do vlastní absorbce patří absorbce ultrafialové oblasti a infračervené oblasti. Vlastní absorbce je způsobena interakcí světla se základními stavebními atomy optického vlákna.

Do nevlastní absorbce spadá oblast Absorbce na OH Iontech. OH ionty ve skle vytváří mikrotrhliny, tyto mikrotrhliny mohou znamenat, že optické vlákna může prasknout [5][6][8][9].

3 Polydimethylsiloxan (PDMS)

Polydimethylsiloxan patří do organokřemičité sloučeniny, velmi často se nazývá silikonem. Polydimethylsiloxan je nehořlavý, netoxický, bez zápachu a chuti a díky své vysoké viskozitě téměř nerozpustná ve vodě. PDMS má velmi dobré teplotní odolnosti a velmi dobrou flexibilitou. Běžná teplotní použitelnost se pohybuje v rozmezí od -60°C až po 200°C [11].

3.1 Chemické složení



Obrázek 3.1: Chemické složení PDMS [13]

PDMS obsahují v jedné molekule Si-O vazbu. Pevnost těchto molekul není vysoká, ale pro běžný tepelný rozsah se pevnost nemění. Polydimethylsiloxan je chemicky čistý materiál, který obsahuje velmi málo nečistot, to znamená, že to není vhodný materiál pro bakterie. Pro výrobu polydimethylsiloxanu se používá technický křemík a kyselina chlorovodíková s metanolem, to vytváří chlormetan. Výroba následně prochází syntézou, rektifikací, hydrolýzou a polykondenzací. Výsledné složení polydimethylsiloxanu je na obrázku 3.1 [10].

Využití PDMS v praxi má velké spektrum v různých oborech. Například v elektronice, letectví, potravinovém průmyslu, lékařství a automobilovém průmyslu. Nevýhodou PDMS je nákladná výroba a složitá výroba. Mezi výhody patří hlavně teplotní stabilita [12].

3.2 Sylgard

Sylgard je dvousložkový zalévací a zapouzdřovací elastomer na bázi polydimethylsiloxanu doplněný o vytvrzovací činidlo. Teprve po přidání vytvrzovacího činidla lze PDMS vytvrdit. Existují různé varianty silikonových gelů, které mají různé vlastnosti a každý gel je použitý na něco jiného.

3.2.1 Sylgard 184

Sylgard 184 je dvousložková kapalina, která se ředí v poměru 10:1. Poté co kapalina je promíchána vzniká flexibilní elastomer, který je vhodný pro povrchové ochrany zařízení. Pokud je to možné, nalévání a dávkování silikonu a činidla by mělo být prováděno za sníženého tlaku. Hlavně když tekutina má hodně vzduchových bublinek. Sylgard 184 je vytvrzován na vzduchu při běžné pokojové teplotě. Při pokojové teplotě je to zdlouhavý proces a tak se tento proces může urychlit zvýšením teploty prostředí až na převyšující 150°C . Sylgard 184 už začíná

tvrdnout už při míchání silikonu a činidla. Zpočátku se zvyšuje viskozita a následně gelovatěním a finální konverzí na pevný elastomer[12].

Tento typ elastomeru je použit pro výrobu optických světlovodů v praktické části této práce.

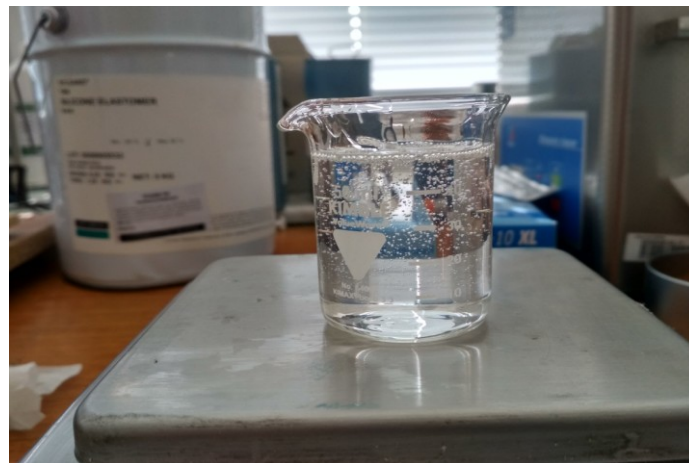
4 Výroba vlnovodů

4.1 Příprava směsi

Pro výrobu vlnovodů byl použit Sylgard 184. Je to kapalina, která se ředí v poměru 10:1. V mém případě jsem na 50g elastomeru potřeboval 5g vytvrzovacího činidla. Poté co je elastomer a činidlo pečlivě promícháno dohromady je potřeba, aby se vytvořené vzduchové bublinky odstranili. Pro to, aby se odstranily v co možná nejkratším čase je potřeba snížit celkovou teplotu vzorku přibližně na 0°C až 5°C . Po přibližně hodině jsem začal s naplňováním Sylgardu do PVC hadic.



Obrázek 4.1: Elastomer (vlevo) a vytvrzovací činidlo (vpravo)



Obrázek 4.2: Smíchaný elastomer s činidlem

4.2 Naplňování vzorků

Poté co jsem měl připravenou směs, tak jsem potřeboval zajistit stálý tvar po vytvrdnutí. Využil jsem tedy PVC hadice o velikostech 6x9 mm pro samotný vzorek a 4x6 mm pro těsnění mezi injekční stříkačkou a samotnou hadicí. Před naplňováním vzorků, jsem si větší hadice předpřipravil na 20 cm kusy a menší hadice na 2 cm kusy.

Proces naplňování probíhal takto:

1. Naplnění injekční stříkačky směsí
2. Nasunutí PVC hadice na stříkačku
3. Pomalu naplňovat hadici směsí
4. Nechat vzorek vytvrdit ve vertikální poloze při pokojové teplotě



Obrázek 4.3: Vzorky ve vertikální poloze

Tento proces trval přibližně 2 minuty a samotné vytvrzení trvalo jeden den. Avšak tento proces byl rychlý, nezaručoval perfektní vzorky bez vzduchových bublinek. Jelikož při plnění vzorků se do hadice dostával vzduch, vznikaly ve vzorku opět vzduchové bubliny. Díky tomuto jevu bylo potřeba plnit vzorek velmi pomalu, aby vzduchových bublin bylo co nejméně. Při vytvrzování vzorků většina bublin zmizela, ale některé vzorky nebyly dokonalé.



Obrázek 4.4: Vzorek se vzduchovými bublinami

4.3 Finální úprava světlovodů

Posledním krokem bylo vyjmutí světlovodu z PVC hadice. Pro tento krok jsem využil malé nůžky. Těmito nůžkami jsem opatrně nastříhl začátek hadice ze dvou stran a poté jsem hadici pouhým tahem ruky oddělal hadici od vzorku.



Obrázek 4.5: Proces vyjmutí vzorku z PVC hadice



Obrázek 4.6: Vzorek po vyjmutí z hadice

Jakmile jsem měl vyjmuté vzorky, potřeboval jsem, aby všechny vzorky měly stejnou velikost. V mém případě jsem všechny vzorky zkrátil na 10 cm kusy.

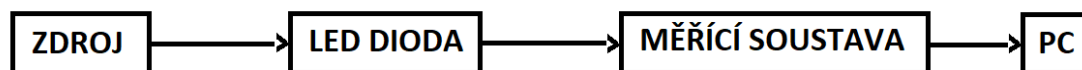


Obrázek 4.7: Světlovody v plechové krabičce

Výsledných 13 vlnovodů jsem vložil do plechové krabičky a plechovou krabičku jsem vložil do horkovzdušné pece, kde vlnovody neustále tepelně zatěžuji při 100°C.

5 Měřicí pracoviště

Pro sestavení měřicí soustavy jsem využil komponenty od firmy Thorlabs. Tato americká firma se specializuje na výrobu stavebních komponent pro laserové a optické systémy, taktéž vyvíjí software pro některé ze svých komponent.



Obrázek 5.1: Blokové schéma měření

5.1 Použité přístroje

5.1.1 Rohde & Schwarz HM8143

Tabulka 5.1: Parametry Rohde & Schwarz HM8143

Vlastnost	Hodnota
Výstupní napětí	5V, 30V
Výstupní proud	2A
Počet výstupů	3
Jmenovitý výkon	60W
Napájecí napětí	103 až 253V ac
Vstupní konektor	IEC 320
Výstupní konektor	Bezpečnostní zásuvka 4mm

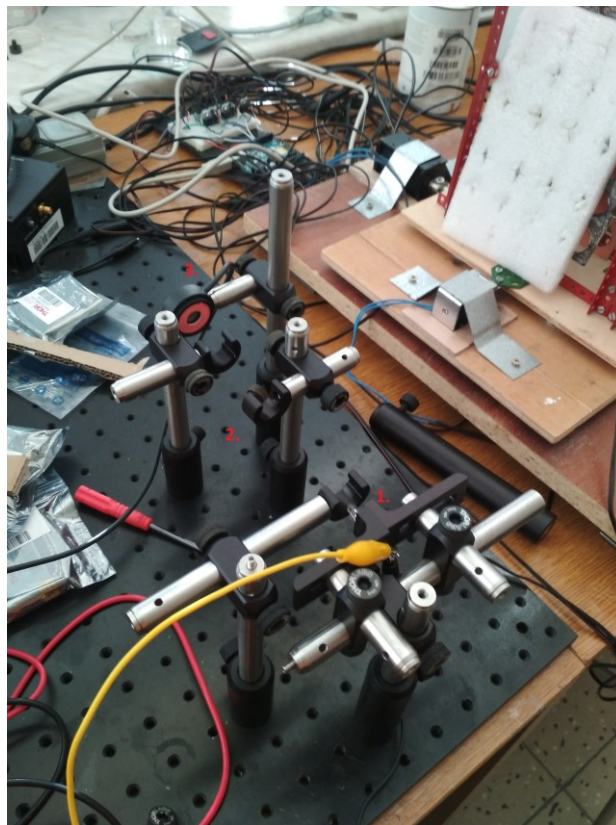
5.1.2 LED diody

Tabulka 5.2: Parametry použitých LED diod

Název	Vlnová délka	Barva
LED 5MM RED HLPM-3750	635 nm	Červená
LED591E	590 nm	Oranžová
LED528EHP	525 nm	Zelená
LED465E	465 nm	Modrá

5.1.3 Měřicí soustava

Měřicí soustavu jsem sestavoval tak, aby podmínky pro každý vlnovod zůstaly stejné. Celá myšlenka měřicí soustavy byla taková, aby se s ní po celou dobu měření nijak neoperovalo, nýbrž se jen vlnovody budou vyměňovat.

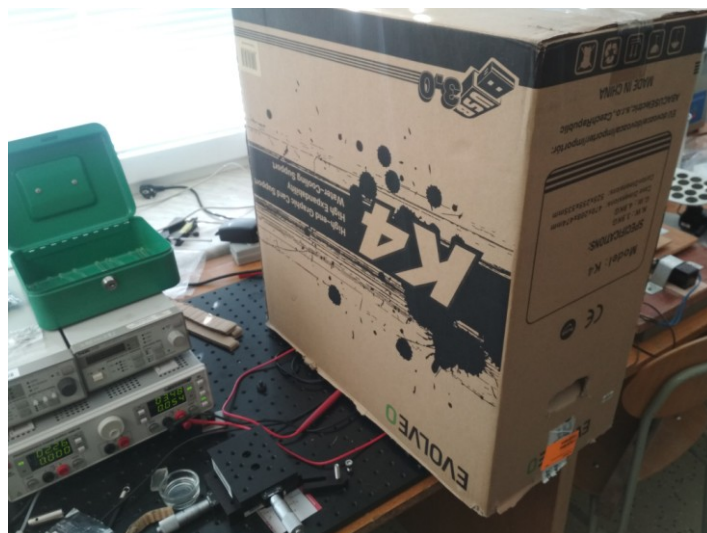


Obrázek 5.2: Měřicí soustava

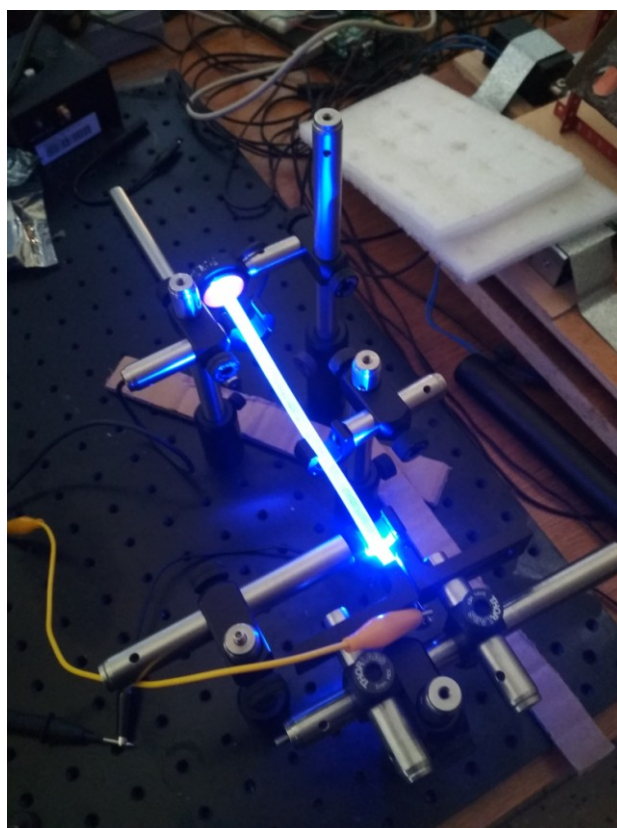
Číslem 1. je na obrázku označena LED dioda (zdroj světla). Číslem 2. jsou podpůrné sloupce pro uchování horizontální polohy vlnovodů. Číslo 3. označuje samotný detektor pro snímání výstupního výkonu. Z tohoto detektoru se data přenášejí do Power meteru a pomocí USB kabelu se z Power meteru do počítače se spuštěným softwarem Thorlabs Optical Power Meter Utility ukazuje aktuální naměřený výkon.



Obrázek 5.3: Thorlabs Power Meter



Obrázek 5.4: Měřicí soustava se zatemňovacím boxem



Obrázek 5.5: Měřicí soustava se světlovodem

Pro to, abych co nejpřesněji měřil výstupní výkon, využil jsem také zatemňovací box z důvodu omezení příjmu světla na detektor z místnosti. Viz. Obrázek 5.4.

6 Měření

6.1 Metodika měření

Všech 13 vyrobených vlnovodů jsem neustále tepelně zatěžoval v horkovzdušné peci při teplotě 100°C. Měření trvalo od 18. Února do 8. Dubna (přibližně 2 měsíce), kde každý týden bylo provedeno jedno samostatné měření útlumových parametrů všech vlnovodů. Celkově bylo provedeno 7 samostatných měření. První měření bylo provedeno ještě před teplotní zátěží pro zjištění útlumových parametrů před samostatným měřením. Při měření jsem vlnovody vytahoval z pece na dobu jen nezbytně nutnou a měřil výstupní výkon a pomocí vzorce (2.4) jsem vypočetl útlum.

6.2 Vypočtené hodnoty útlumu pro jednotlivé vlnovody

Tabulka 6.1: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.1

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	9,02	7,64	1,25	5,95
25.úno	8,31	8,15	2,17	5,95
04.bře	8,45	7,93	1,5	5,68
11.bře	9,430951	8,504904088	4,084054	7,201593
18.bře	9,444827	6,379160389	1,865567	5,228787
25.bře	10,13391	6,249405919	2,602645	5,205869
08.dub	11,50525	8,171871245	2,43038	5,866204

Tabulka 6.2: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.2

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	8,523518	7,522583	1,226469	6,532125
25.úno	7,70481	8,60953	2,524279	6,532125
04.bře	7,983546	6,287578	2,552725	5,818566
11.bře	8,375442	8,752252	2,602645	6,532125
18.bře	9,054971	6,5661	1,648633	5,093059
25.bře	10,07165	6,355021	3,136191	7,318977
08.dub	11,23362	7,974192	1,658721	6,680428

Tabulka 6.3: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.3

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	8,372727	6,756787112	0,909196	5,205869
25.úno	6,217673	6,914959904	1,059654	5,44068
04.bře	6,129339	5,09326109	0,542658	5,489205
11.bře	7,191734	6,136861593	0,750647	6,853972
18.bře	7,443767	5,560141594	1,365827	3,880576
25.bře	8,493831	4,877386081	1,940355	5,917062
08.dub	8,846013	5,152973523	1,003705	4,723906

Tabulka 6.4: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.4

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	8,427356	7,072425	1,064936	7,201593
25.úno	8,030454	7,646622	2,971867	7,201593
04.bře	8,920504	6,819367	2,615215	7,579479
11.bře	9,267817	7,923098	2,678616	7,579479
18.bře	9,493742	7,566343	1,876172	5,513673
25.bře	11,10953	6,9897	4,376127	7,781513
08.dub	11,35058	7,566343	2,43038	6,430944

Tabulka 6.5: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.5

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	9,142879	8,172947164	2,358595	5,205869
25.úno	7,587706	8,899823572	1,0124	5,44068
04.bře	6,766541	5,276023691	0,589779	5,688916
11.bře	7,832345	6,160492132	1,109207	5,952206
18.bře	7,761502	5,404937183	0,750647	3,793848
25.bře	9,306683	5,495184933	2,299666	6,853972
08.dub	10,63212	6,201986634	1,365827	5,457603

Tabulka 6.6: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.6

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	8,173779	7,156757	0,986368	4,983106
25.úno	6,2276	6,973342	1,328226	5,688916
04.bře	6,427584	5,851527	0,8167	7,579479
11.bře	8,318777	6,455291	0,74246	7,201593
18.bře	8,329513	6,163878	1,272427	4,171433
25.bře	9,752159	5,668796	2,04948	6,212273
08.dub	9,899314	6,266715	1,365827	4,829508

Tabulka 6.7: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.7

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	7,166988	6,948920919	2,184156	6,958789
25.úno	5,995405	6,908521141	1,648633	4,628808
04.bře	8,284065	6,458190515	0,758849	6,382722
11.bře	8,600065	6,722748895	1,658721	6,232493
18.bře	8,384142	6,931907216	0,750647	4,198537
25.bře	9,524773	5,696693303	1,812925	7,723989
08.dub	9,38959	6,239053245	1,648633	4,989625

Tabulka 6.8: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.8

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	7,085504	6,750578	1,760913	5,704271
25.úno	5,772013	7,800894	1,480625	4,014005
04.bře	7,109789	4,420617	0,709868	7,062692
11.bře	7,216622	5,997716	1,558879	7,201593
18.bře	7,191734	4,812378	0,069489	3,694269
25.bře	8,358094	4,867321	2,323142	6,129493
08.dub	7,709002	6,124759	0,74246	4,353527

Tabulka 6.9: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.9

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	7,802726	6,760672026	2,287976	6,820693
25.úno	6,648157	7,145700812	1,792045	5,818566
04.bře	7,526964	5,238631684	1,558879	6,702955
11.bře	8,421862	6,793443235	0,511525	6,232493
18.bře	8,040501	5,412909026	0,669468	4,137343
25.bře	9,609827	5,806366343	2,19557	6,192147
08.dub	10,09338	6,211566161	1,244794	5,615456

Tabulka 6.10: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.10

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	8,800247	6,658498	0,875333	7,101422
25.úno	8,127357	7,030866	2,172772	5,286617
04.bře	7,580915	5,653106	1,0124	6,132322
11.bře	8,946447	5,705829	0,669468	6,532125
18.bře	8,736029	6,186976	0,926228	4,669021
25.bře	10,23859	6,004242	2,311388	7,528454
08.dub	11,67491	6,184933	1,750585	5,231086

Tabulka 6.11: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.11

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	7,522498	6,177450158	0,717993	6,15786
25.úno	5,605238	6,623712359	0,970824	5,387922
04.bře	6,915326	5,612338227	0,685583	5,638121
11.bře	8,330588	5,185303287	2,808266	6,853972
18.bře	6,9897	5,055828496	0,147233	4,520105
25.bře	8,92112	5,031225476	1,918855	6,969068
08.dub	11,10749	5,967823248	1,886804	4,980935

Tabulka 6.12: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.12

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	8,109438	7,051596	1,781643	6,955368
25.úno	6,811781	7,157609	1,771265	5,831746
04.bře	6,770293	5,875553	1,162935	6,252807
11.bře	8,308067	6,34724	2,808266	5,952206
18.bře	8,008434	5,707049	0,140107	4,273496
25.bře	9,481812	5,618907	2,082759	6,824009
08.dub	9,871628	5,881898	1,812925	5,802802

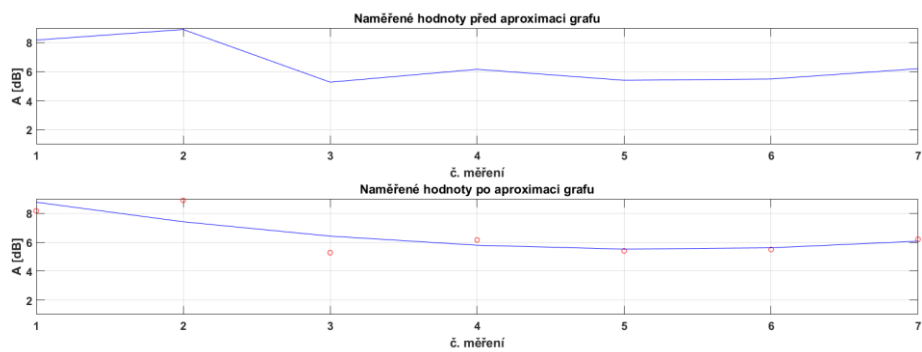
Tabulka 6.13: Vypočtené hodnoty pro vzorek č.13

Datum	465 nm	525 nm	635 nm	590 nm
18.úno	7,462656	6,94973276	2,138798	5,984901
25.úno	6,126102	6,781710824	1,578664	5,321688
04.bře	6,781569	5,414619183	0,750647	5,979434
11.bře	7,95584	5,481846105	2,515658	6,532125
18.bře	7,711798	5,673029277	0,621479	4,744411
25.bře	9,514876	5,401525154	2,161418	6,613538
08.dub	9,682611	5,707658803	1,792045	5,92245

Veškeré naměřené hodnoty se nachází v příloze.

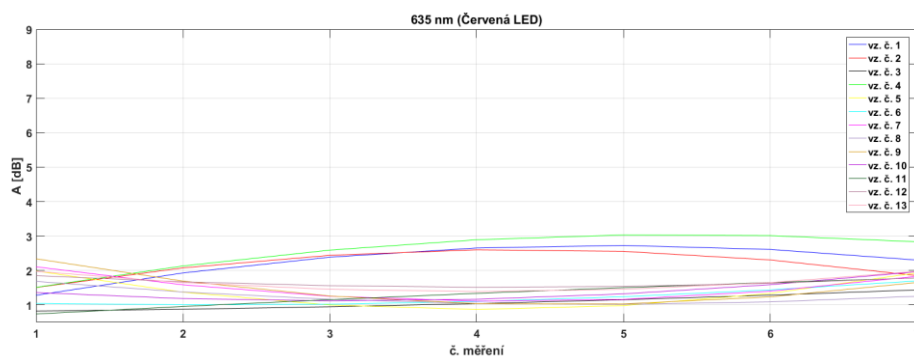
6.3 Grafické zpracování výsledků

Pro lepší přehlednost všechny následující grafy zpracovány po aproximaci grafu druhého řádu. Na obrázku 6.1 je názorně ukázána aproximace pro jeden vlnovod.

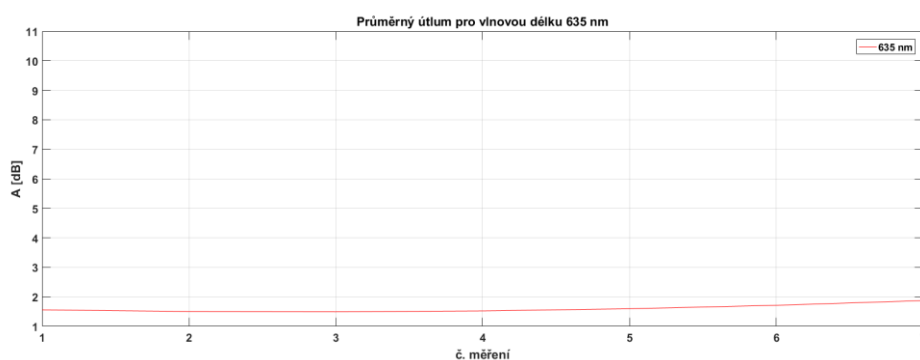


Obrázek 6.1: Aproximace grafu

6.3.1 635nm (červená LED)



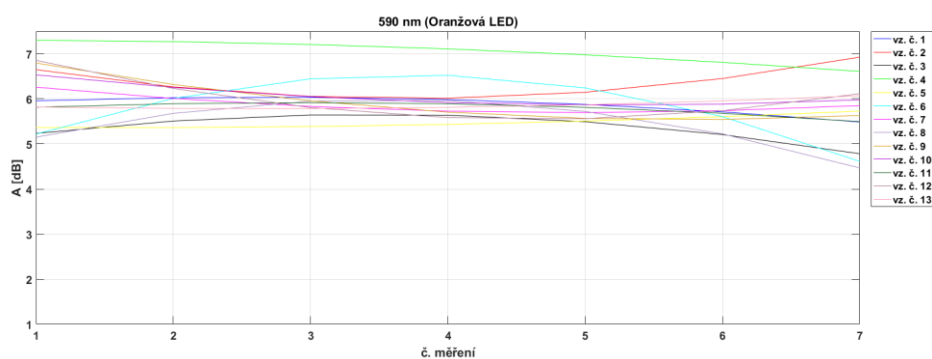
Obrázek 6.2: Vývoj útlumu v čase pro 635nm



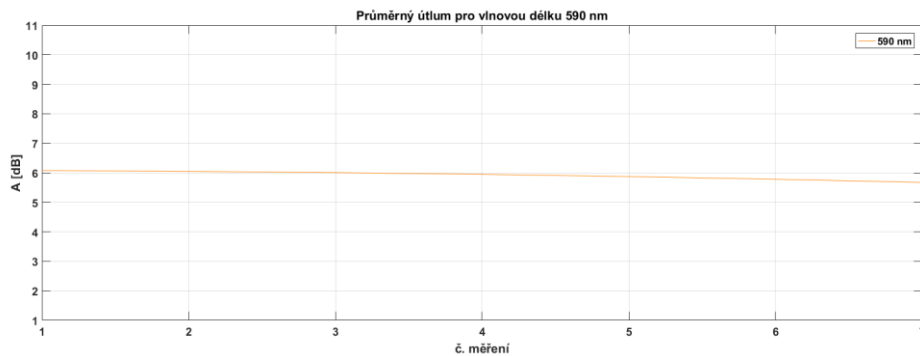
Obrázek 6.3: Průměrný útlum pro vlnovou délku 635nm

Na obrázku 6.2 je znázorněný vývoj útlumu v čase. Na obrázku 6.3 je průměrný útlum pro 635nm. Lze říct, že útlum je téměř neměnný a trendem je konstantní křivka.

6.3.2 590nm (oranžová LED)



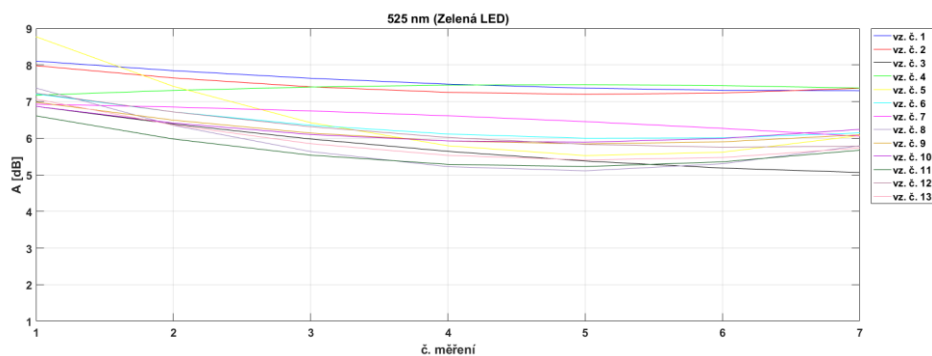
Obrázek 6.4: Vývoj útlumu v čase pro 590nm



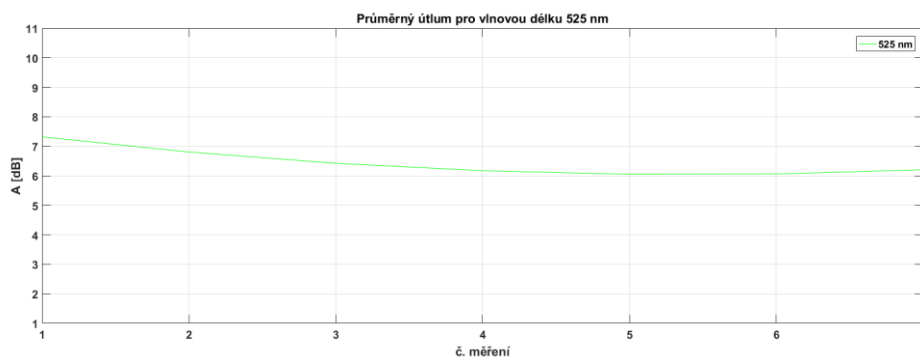
Obrázek 6.5: Průměrný útlum pro vlnovou délku 590nm

Pro vlnovou délku 590nm je situace téměř stejná s tím rozdílem, že hodnota útlumu se pohybuje kolem 6 dB.

6.3.3 525nm (zelená LED)



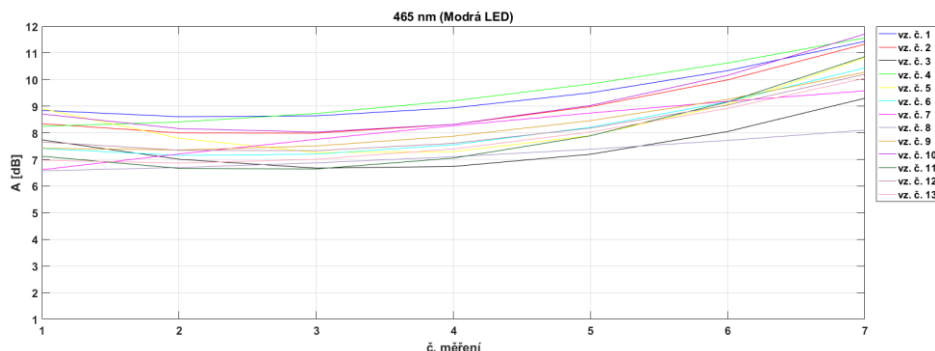
Obrázek 6.6: Vývoj útlumu v čase pro 525nm



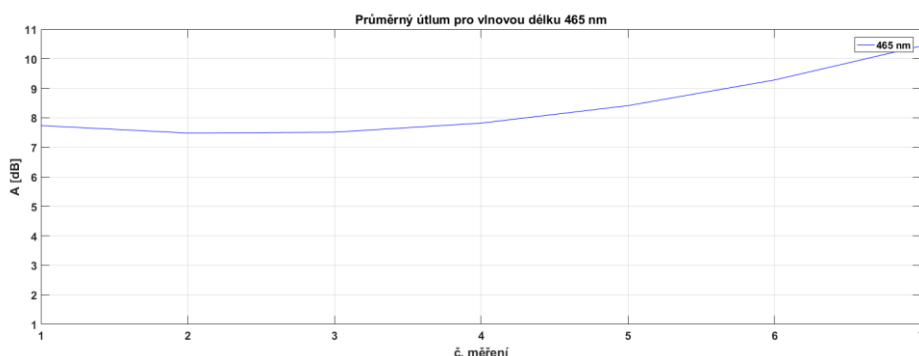
Obrázek 6.7: Průměrný útlum pro vlnovou délku 525nm

Z grafů lze vidět, že trend útlumu je klesající, ačkoliv průměrný útlum od 5. měření má trend rostoucí a je možné, že by se hodnoty útlumu pohybovaly kolem referenčního útlumu a trend křivky by byl konstantní. Tohle by se pouze mohlo prozkoumat delším zatěžováním vlnovodů. Pokles útlumu mohl způsobit lidský faktor. Například LED dioda nemusela být v nejlepším úhlu vůči vlnovodu pro navázání světla do vlnovodu.

6.3.4 465nm (modrá LED)



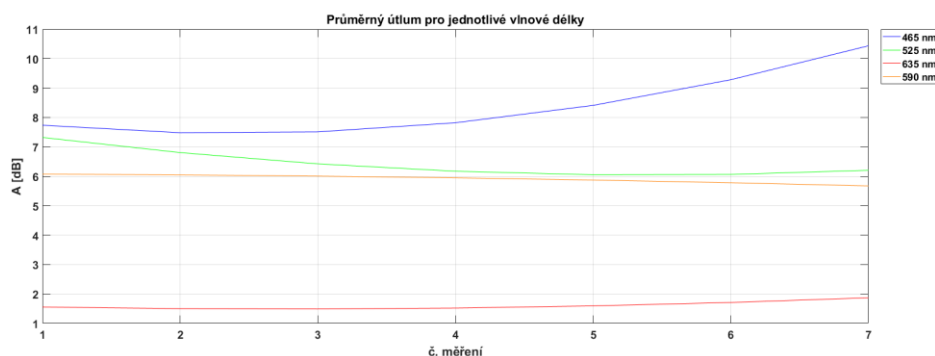
Obrázek 6.8: Vývoj útlumu v čase pro 465nm



Obrázek 6.9: Průměrný útlum pro vlnovou délku 465nm

Pro vlnovou délku 465nm byl trend křivky rostoucí již od první chvíle, co se vlnovody začaly teplotně zatěžovat. Také z grafů lze vyčíst, že hodnoty útlumu pro vlnovou délku 465nm mají nejvyšší hodnoty ze všech použitých vlnových délek. Tyto výsledky se mohou využít pro oblast osvětlování a to konkrétně zdroje záření ve formě modré LED a vlnovodu z PDMS, kde na konci vlnovodu je nanesená vrstva luminoforu pro generování bílého světla na výstupu. Při dlouhodobém působení vysokých teplot bude dopadat na luminoforovou vrstvu méně modrého budícího světla a změní se odstín výstupního bílého světla[14].

6.3.5 Celkové porovnání všech vlnových délek



Obrázek 6.10: Průměrný útlum pro jednotlivé vlnové délky

Na obrázku 6.10 lze vidět průměrný útlum všech použitých vlnových délek. Z grafu je zřejmé, že nejmenší hodnoty útlumu má vlnová délka 635nm, vlnové délky 590nm a 525nm mají téměř stejný útlum a nejvyšší hodnoty útlumu má vlnová délka 465nm. Z tohoto grafu lze také říci, že menší vlnová délka je rovna vyšším hodnotám útlumu.

7 Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo dlouhodobé tepelné zatěžování vytvořených optických vlnovodů z polydimethylsiloxanu a sledování vlivu tepelné zátěže na útlumové parametry jednotlivých vzorků vlnovodů.

Teoretická část práce je zaměřena na popis světla, základní pojmy a podmínky pro vedení světla v optických komunikacích. Následuje popis optických vláken, typy optických vláken a jaké jevy mají vliv na výsledný útlum. Další kapitola pojednává o materiálu polydimethylsiloxan (PDMS), jehož optické parametry jsou velmi podobné klasickým křemičitým vláknům. V této kapitole jsou popsány základní vlastnosti tohoto materiálu, možné využití v praxi a konkrétní typy Sylgardů.

V praktické části je popsán a vysvětlen celkový výrobní proces vlnovodů a následné měření jejich útlumových parametrů.

Pro výrobu vlnovodů byl využit polymer s označením Sylgard 184 v doporučeném poměru 10:1. V práci je detailně popsáno, jaký způsob pro naplňování vzorků byl zvolen, stejně tak metodika pro jejich vytvrzení. V práci je také popsáno, jakým způsobem se vlnovody upravovaly tak, aby dosahovaly předepsané minimální délky 10cm. Navazuje kapitola, která se věnuje popisu konstrukce měřicí soustavy a použitých přístrojů. Dalším úkolem práce bylo tepelně zatěžovat vlnovody a změřit jejich útlumové parametry. Celkem bylo použito 13 vzorků pro 4 LED diody s různými vlnovými délkami. Vlnovody byly pokaždé vytahovány z teplotní pece jen na dobu nezbytně nutnou, aby se nenarušilo tepelné namáhání. Během dvou měsíců bylo provedeno celkem 7 měření s tím, že první měření bylo ještě před samotným tepelným zatěžováním vlnovodů pro zjištění referenčních hodnot. Z obrázku 6.10 lze usoudit, že pro menší vlnové délky jsou hodnoty útlumu vyšší. Nejnižší útlum má tedy 635nm (červená LED), kde se hodnoty útlumu průměrně pohybovaly v rozmezí 1,5 dB do 2 dB a trend křivky je konstantní. Nejvyšší hodnoty útlumu jsou pro vlnovou délku 435nm (modrá LED), kde se hodnoty útlumu průměrně pohybovaly v rozmezí od 7,9 dB do 10,5 dB a trend křivky je rostoucí. Vlnová délka 590nm (oranžová LED) má stejný průběh jako vlnová délka 635nm s tím rozdílem, že má vyšší hodnoty útlumu. Hodnoty útlumu se průměrně pohybovaly kolem 6 dB, a tedy trend křivky je také konstantní. Vlnová délka 525nm měla ze začátku klesající trend a na konci měření měla trend rostoucí. Průměrně se hodnoty útlumu pohybovaly kolem 7,5 dB do 6,5 dB. Na obrázcích 6.2, 6.4, 6.6 a 6.8 jsou vyobrazeny detailní vývoje útlumu v čase pro každý vlnovod, kde každý z těchto obrázků reprezentuje danou vlnovou délku.

Naměřené výsledky pro vlnovou délku 435nm se mohou dále využít pro oblast osvětlování, a to konkrétně zdroje záření ve formě modré LED a vlnovodu z PDMS, kde na konci vlnovodu je nanášena tenká vrstva luminoforu pro generování bílého světla na výstupu. Z obrázku 6.9, který ukazuje průměrný útlum pro 435nm, lze usoudit, že při dlouhodobém působení vysokých teplot bude dopadat na luminoforovou vrstvu méně modrého budícího světla a výstupní bílé světlo bude měnit svou barvu a nebude stabilní.

Použitá literatura

- [1] OLBRECH, Jan. Světlo jako elektromagnetické vlnění [online]. [cit. 2019-03-10]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/1441/podzim2015/FY2BP_KOS2/60555686/Svetlo_jako_elektromagneticke
- [2] Druhy elektromagnetického vlnění: Elektromagnetické spektrum [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://moodle.oahstrebic.cz/mod/book/view.php?id=1637&chapterid=272>
- [3] Elektromagnetické vlny [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://www.gymsusice.cz/images_users/predmety/fyzika/f_texty-elmagneticke_vlny_1.pdf
- [4] Optika [online]. 22.2.2003 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.fyzika.webz.cz/index.php?clanek=9&title=Optika>
- [5] Přenosové systémy a média [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: https://owncloud.cesnet.cz/index.php/s/49d2587a197e9d91871be30a0a0fc997?path=%2F0000_Literatura#pdfviewer
- [6] Parametry optických vláken [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://publi.cz/books/185/06.html>
- [7] PETERKA, Jiří. Optická vlákna [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://www.earchiv.cz/a96/a645k150.php3>
- [8] Přenosová cesta optická [online]. In: . [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: http://fei1.vsb.cz/kat420/vyuka/FEI/AEO/sylaby/AEO_02.pdf
- [9] ING. MARŠÁLEK, Leoš. Optická vlákna [online]. In: . 15.4.2006 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [10] PDMS [online]. [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://www.plasma.com/en/plasmatechnik/lexikon/polydimethylsiloxane/>
- [11] VÁCLAVÍK, Adam. Analýza optických prvků z Polydimethylsiloxanu (PDMS)[online]. Ostrava, 2016 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/115972>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [12] HUB, Michal. Flexibilní světlovod [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10084/128654>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava.
- [13] Polydimethylsiloxane [online]. In: . [cit. 2019-04-24]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Polydimethylsiloxane#/media/File:PmdsStructure.png>

- [14] SCHUBERT, E. Fred. Light-emitting diodes. 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 0-521-86538-7.

Seznam příloh

Příloha A:	Naměřené hodnoty výstupního výkonu.....	xlii
Příloha B:	Naměřený vstupní výkon	xlvi
Příloha C:	Vypočtené hodnoty útlumu	xlvi

Součástí BP je CD.

Adresářová struktura přiloženého CD:

1. Fotografie pracoviště
2. Fotografie vlnovodů
3. Výsledky měření

Příloha A: *Naměřené hodnoty výstupního výkonu*

Tabulka A.1: Měření č.1 18. Února 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	6,888	4,553	472	1,6
2	7,727	4,688	475	1,4
3	8	5,592	511	1,9
4	7,9	5,2	493	1,2
5	6,7	4,036	366	1,9
6	8,375	5,1	502	2
7	10,56	5,35	381	1,269
8	10,76	5,6	420	1,694
9	9,122	5,587	372	1,31
10	7,25	5,72	515	1,228
11	9,73	6,39	534	1,526
12	8,5	5,225	418	1,27
13	9,865	5,349	385	1,588

Tabulka A.2: Měření č.2 25. Února 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	8,1	4,05	381,5	1,6
2	9,33	3,65	352,3	1,4
3	13,14	5,392	493,6	1,8
4	8,656	4,556	317,8	1,2
5	9,585	3,414	499	1,8
6	13,11	5,32	464	1,7
7	13,83	5,4	431	2,17
8	14,56	4,397	448	2,5
9	11,9	5,113	417	1,65
10	8,465	5,25	382	1,865
11	15,13	5,766	503,8	1,822
12	11,46	5,099	419	1,645
13	8,1	4,05	381,5	1,6

Tabulka A.3: Měření č.3 4. Března 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	7,855	4,26	446	1,702
2	8,75	6,23	350	1,65
3	13,41	8,202	556	1,78
4	7,052	5,512	345	1,1
5	11,58	7,864	550	1,7
6	12,52	6,888	522	1,1
7	8,165	5,99	529	1,449
8	10,7	9,576	535	1,239
9	9,72	7,932	440	1,346
10	9,6	7,21	499	1,535
11	11,19	7,278	538	1,72
12	11,57	6,85	482	1,493
13	11,54	7,617	530	1,59

Tabulka A.4: Měření č.4 11. Března 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	6,27	3,739	246	1,2
2	7,995	3,532	346	1,4
3	10,5	6,45	530	1,3
4	6,51	4,275	340	1,1
5	9,06	6,415	488	1,6
6	8,1	5,994	531	1,2
7	7,592	5,636	430	1,5
8	10,44	6,66	440	1,2
9	7,91	5,545	560	1,5
10	7,01	7,123	540	1,4
11	8,078	8,03	330	1,3
12	8,12	6,145	330	1,6
13	8,806	7,5	353	1,4

Tabulka A.5: Měření č.5 18. Března 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	6,25	6,1	410	1,89
2	6,837	5,843	431	1,95
3	9,908	7,366	460	2,578
4	6,18	4,641	409	1,77
5	9,209	7,634	530	2,63
6	8,08	6,41	470	2,411
7	7,979	5,371	530	2,396
8	10,5	8,75	620	2,691
9	8,636	7,62	540	2,43
10	7,358	6,376	509	2,15
11	11	8,273	609	2,225
12	8,7	7,121	610	2,355
13	6,25	6,1	410	1,89

Tabulka A.6: Měření č.6 25. Března 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	5,333	6,285	346	1,9
2	5,41	6,134	306	1,168
3	7,78	8,62	403	1,613
4	4,26	5,3	230	1,05
5	6,452	7,477	371	1,3
6	5,823	7,184	393	1,507
7	6,136	7,138	415	1,064
8	8,027	8,64	369	1,536
9	6,017	6,96	380	1,514
10	5,206	6,65	370	1,113
11	7,051	8,32	405	1,266
12	6,197	7,267	390	1,309
13	6,15	7,64	383	1,374

Tabulka A.7: Měření č.7 8. Dubna 2019

č.	Modrá LED Pout [mW]	Zelená LED Pout [mW]	Červená LED Pout [μW]	Oranžová LED Pout [mW]
1	3,889	4,037	360	1,632
2	4,14	4,225	430	1,353
3	7,174	8,09	500	2,123
4	4,03	4,641	360	1,433
5	4,755	6,354	460	1,793
6	5,629	6,26	460	2,072
7	6,33	6,3	431	1,997
8	9,321	6,468	531	2,312
9	5,383	6,34	473	1,729
10	3,74	6,379	421	1,889
11	4,262	6,706	408	2,001
12	5,665	6,84	415	1,656
13	5,917	7,12	417	1,611

Příloha B: *Naměřený vstupní výkon*

Tabulka B.1: Vstupní výkon LED diod

Modrá LED Pin [mW]	Zelená LED Pin [mW]	Červená LED Pin [μW]	Oranžová LED Pin [mW]
55	26,5	630	6,3

Příloha C: *Vypočtené hodnoty útlumu*

Tabulka C.1: Měření č.1 18. Února 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	9,02269551	7,64948224	1,25398551	5,9522057
2	8,52351777	7,52258271	1,2264694	6,5321251
3	8,37272703	6,75678711	0,90919649	5,2058695
4	8,42735598	7,0724253	1,0649363	7,201593
5	9,14287887	8,17294716	2,35859464	5,2058695
6	8,17377874	7,15675698	0,98636832	4,9831055
7	7,16698771	6,94892092	2,18415574	6,9587893
8	7,08550418	6,75057847	1,76091259	5,7042714
9	7,80272622	6,76067203	2,2879761	6,8206925
10	8,80024683	6,65849845	0,8753332	7,1014218
11	7,52249849	6,17745016	0,71799292	6,1578602
12	8,10943764	7,05159579	1,78164268	6,9553683
13	7,462656	6,94973276	2,1387982	5,9849005

Tabulka C.2: Měření č.2 25. Února 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	8,31877671	8,15790851	2,17846007	5,9522057
2	7,70481046	8,60953009	2,52427906	6,5321251
3	6,21767324	6,9149599	1,05965398	5,4406804
4	8,03045442	7,64662159	2,97186657	7,201593
5	7,58770572	8,89982357	1,01240004	5,4406804
6	6,22759998	6,97334242	1,32822569	5,6889163
7	5,99540509	6,90852114	1,64863279	4,6288082
8	5,77201315	7,80089408	1,48062535	4,0140054
9	6,64815728	7,14570081	1,79204494	5,8185661
10	8,12735727	7,03086571	2,17277187	5,2866171
11	5,60523761	6,62371236	0,97082386	5,3879218
12	6,81178072	7,15760862	1,77126526	5,8317465
13	6,12610174	6,78171082	1,57866439	5,3216882

Tabulka C.3: Měření č.3 4. Března 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	8,452165	7,93836275	1,50005691	5,6838099
2	7,98354636	6,28757827	2,55272505	5,8185661
3	6,12933912	5,09326109	0,54265758	5,4892055
4	8,92050386	6,81936665	2,61521454	7,5794786
5	6,7665413	5,27602369	0,5897786	5,6889163
6	6,42758361	5,85152735	0,81670046	7,5794786
7	8,284065	6,45819052	0,75884877	6,3827216
8	7,10978912	4,42061737	0,70986767	7,0626924
9	7,52696425	5,23863168	1,55887873	6,7029549
10	7,58091456	5,65310609	1,01240004	6,1323217
11	6,91532603	5,61233823	0,68558274	5,638121
12	6,77029331	5,87555302	1,16293511	6,2528074
13	6,78156881	5,41461918	0,7506468	5,9794343

Tabulka C.4: Měření č.4 11. Března 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	9,43095149	8,50490409	4,08405442	7,201593
2	8,37544221	8,75225179	2,60264451	6,5321251
3	7,1917339	6,13686159	0,7506468	6,853972
4	9,26781701	7,92309755	2,67861632	7,5794786
5	7,83234492	6,16049213	1,10920727	5,9522057
6	8,31877671	6,45529135	0,74246028	7,201593
7	8,6000649	6,72274889	1,65872094	6,2324929
8	7,21662191	5,99771645	1,55887873	7,201593
9	8,42186206	6,79344323	0,51152522	6,2324929
10	8,94644672	5,7058293	0,6694679	6,5321251
11	8,33058841	5,18530329	2,8082661	6,853972
12	8,3080666	6,34723987	2,8082661	5,9522057
13	7,95584008	5,48184611	2,51565844	6,5321251

Tabulka C.5: Měření č.5 18. Března 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	9,44482672	6,37916039	1,86556693	5,2287875
2	9,0549711	6,56609988	1,64863279	5,0930594
3	7,44376692	5,56014159	1,36582718	3,8805764
4	9,49374214	7,56634306	1,87617241	5,5136728
5	7,76150217	5,40493718	0,7506468	3,793848
6	8,32951329	6,16387844	1,27242692	4,1714334
7	8,38414224	6,93190722	0,7506468	4,1985374
8	7,1917339	4,81237821	0,0694886	3,6942685
9	8,04050056	5,41290903	0,6694679	4,1373428
10	8,73602906	6,18697566	0,92622767	4,6690209
11	6,98970004	5,0558285	0,14723257	4,5201053
12	8,00843437	5,70704888	0,14010714	4,2734964
13	7,7117983	5,67302928	0,62147907	4,7444105

Tabulka C.6: Měření č.6 25. Března 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	10,1339111	6,24940592	2,60264451	5,2058695
2	10,0716542	6,35502102	3,13619123	7,3189771
3	8,49383093	4,87738608	1,94035503	5,9170618
4	11,1095309	6,98970004	4,37612713	7,7815125
5	9,30668331	5,49518493	2,2996664	6,853972
6	9,75215899	5,6687955	2,04947999	6,212273
7	9,52477339	5,6966933	1,81292453	7,7239892
8	8,35809427	4,86732131	2,32314183	6,1294933
9	9,60982678	5,80636634	2,19556953	6,1921467
10	10,2385853	6,00424229	2,31138825	7,5284539
11	8,92111975	5,03122548	1,91885526	6,9690684
12	9,48181193	5,61890714	2,08275942	6,824009
13	9,51487574	5,40152515	2,16141775	6,6135382

Tabulka C.7: Měření č.7 8. Dubna 2019

č.	Modrá LED A [dB]	Zelená LED A [dB]	Červená LED A [dB]	Oranžová LED A [dB]
1	11,5052475	8,17187125	2,43038049	5,866204
2	11,2336235	7,97419161	1,65872094	6,6804275
3	8,84601317	5,15297352	1,00370545	4,7239056
4	11,3505764	7,56634306	2,43038049	6,4309436
5	10,6321217	6,20198663	1,36582718	5,4576026
6	9,89931441	6,26671541	1,36582718	4,829508
7	9,38958979	6,23905324	1,64863279	4,9896248
8	7,70900182	6,12475863	0,74246028	4,3535272
9	10,0933831	6,21156616	1,24479409	5,6154556
10	11,6749109	6,18493272	1,75058454	5,2310859
11	11,1074924	5,96782325	1,88680386	4,9809346
12	9,87162775	5,88189772	1,81292453	5,8028022
13	9,6826112	5,7076588	1,79204494	5,9224501